# بررسی اثرات صفحه مثلثی بر توزیع غلظت آلاینده و الگوی جریان در کانال‌های مستقیم[★]

الهام یباره پور[۱]    محمود شفاعی بجستان[۲]    سید محمود کاشفی‌پور[۳]

**چکیده** *در این مقاله تأثیر نصب صفحه مثلثی چسبیده به ساحل بر اختلاط عرضی ردیاب و کاهش غلظت آلاینده بررسی‌شده است. صفحات مثلثی ازجمله سازه‌های دوستدار محیط‌زیست هستند که به‌منظور مدیریت رسوب در رودخانه‌ها استفاده می‌شوند. این صفحات با ایجاد جریان‌های ثانویه عرضی می‌توانند در فاصله کوتاه‌تری سبب اختلاط عرضی شوند و به خودپالایی رودخانه کمک نمایند. آزمایش‌های این مطالعه در یک فلوم به عرض ۸۰ سانتیمتر و طول ۱۰ متر انجام گرفت. صفحه مثلثی با طول مؤثر ۳۰٪ عرض فلوم و زاویه ۴۵ درجه نسبت به جریان اصلی، در فاصله ۵۰ سانتیمتری از منبع ردیاب نصب شد. از محلول آب و نمک به‌عنوان ردیاب استفاده شد و میزان شوری به‌وسیله ۹۶ حسگر شوری سنج در هر مقطع عرضی و در چهار مقطع پائین‌دست محل ردیاب برداشت شد. علاوه بر این در محدوده قبل و بعد از صفحه، الگوی سه‌بعدی سرعت نیز ثبت شد. نتایج نشان داد که وجود صفحه باعث افزایش مقدار سرعت عرضی و تغییر جهت آن‌ها شده که نشان از وجود جریان‌های ثانویه دارد و باعث شده که واریانس توزیع غلظت را نسبت به حالت بدون سازه، به میزان ۳۰٪ افزایش یابد. همچنین وجود این سازه باعث یکنواختی توزیع غلظت و کاهش ۸۰٪ مقدار غلظت در نقطه اوج منحنی میانگین توزیع غلظت در مرکز کانال نسبت به حالت بدون سازه شده است.*

**واژه‌های کلیدی** غلظت آلاینده، جریان‌های ثانویه، رودخانه، مسیر مستقیم.

## Investigation of Transverse Distribution of Pollutant and Flow Pattern in the Present of Triangular Vane in the Straight Channels

ElhamYabbarepour    Mahamood Shafai Bajestan    Seyed Mahmood Kashefipour

**Abstract** *In this paper, the effect of installation of a triangular vane attached to the bank on the transverse mixing and reduction of pollutant concentrations has been investigated. Triangular vanes are environment friendly structures and used for river sediment management. By generating secondary currents, these vanes can create transverse mixing in a shorter distance and help the river self-purification. The experiments were conducted in a flume 80 cm wide and 10 m long. A triangular vane with an effective length of 30 % of the channel width and an angle of 45 ° relative to the mainstream was installed at 50 cm downstream of the source of the tracer. Water and salt solution was used as a tracer. The concentration was measured by 96 sensors at each transverse section and in the four downstream sections of the tracer. In addition, around the vane, the 3D velocity pattern was also recorded. The results showed that the presence of the vane causes an increase in the amount of transverse velocity and their direction indicating the presence of secondary currents which resulted in a 30% increase in the variance of the concentration distribution. Also, the existence of this structure has led to the uniformity of concentration distribution and decrease of concentration of 80 % of the concentration at the maximum point of the concentration distribution at the center of the channel relative to the no vane condition.*

**Key Words** Pollutant concentration, Secondary currents, River, Straight path.

---

★ تاریخ دریافت مقاله۹۶/۱۰/۲۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۸/۵ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: دانشجوی دکتری گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.

**Email**: e.yabarepoor14@gmail.com

(۲) استاد، گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.

(۳) استاد گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.

## مقدمه

رودخانه‌ها فاضلاب ناشی از فعالیت‌های انسانی را دریافت کرده و آلودگی را در مسیر خود پخش کرده و غلظت آن را کاهش می‌دهند. امروزه استفاده بیش‌ازحد از رودخانه‌ها به‌عنوان مجرایی برای تخلیه انواع فاضلاب‌ها، باعث کاهش توان خودپالایی رودخانه و بحران آب ناشی از آلودگی شده است؛ بنابراین استفاده از فرایندهای اختلاط و رقیق‌سازی آلودگی به‌منظور بازیابی و امکان استفاده مجدد از آب‌های آلوده ضروری است. همچنین استفاده از روش‌هایی برای افزایش توان خودپالایی رودخانه‌ها حائز اهمیت است. افزایش اختلاط عرضی و درنتیجه خودپالایی رودخانه معمولاً با استفاده از سیستم‌های مکانیکی و طبیعی انجام می‌شود. ازآنجاکه اختلاط به‌وسیله سیستم‌های مکانیکی هزینه‌بر است معمولاً بهتر است به روش طبیعی در آب اختلاط ایجاد شود تا به‌تبع آن خودپالایی رودخانه افزایش یابد (مددیان و عابدینی، ۱۳۹۱). از عوامل مؤثر بر افزایش خودپالایی رودخانه‌ها در روش‌های طبیعی، افزایش اختلاط عرضی با ایجاد تغییراتی در هیدرولیک جریان و افزایش آشفتگی است. از مهم‌ترین عوامل هیدرولیکی که بر افزایش اختلاط عرضی تأثیرگذار هستند سرعت برشی، شدت آشفتگی و جریان‌های ثانویه می‌باشند. بعضی از این عوامل هیدرولیکی به‌طور طبیعی در رودخانه‌ها آبرفتی و قوسی دیده می‌شود که می‌توان به مطالعات خداشناس و همکاران (۱۳۹٤) اشاره کرد که به مطالعهٔ اثر تلماسه بر افزایش اختلاط عرضی در یک کانال مستطیلی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که برای حالت ثابت نسبت عرض به عمق برابر با ۲/۱٤، سرعت برشی برای حالتی که تلماسه وجود دارد به میزان ۲۳ درصد نسبت به حالت بستر صاف افزایش‌یافته است. افزایش سرعت برشی و درنتیجه جریان‌های ثانویه ناشی از وجود تلماسه، باعث افزایش اختلاط عرضی و خودپالایی رودخانه نسبت به حالت بستر صاف شده است. آن‌ها همچنین با رسم نیمرخ قائم سرعت عمودی در مرکز کانال و در محل داده‌برداری غلظت که جریان ثانویه به آن وابسته است، نشان دادند که سرعت عمودی در بستر صاف به‌جز نقاط نزدیک بستر و سطح آب، کم‌تر از بستر تلماسه‌ای است. قاسمی و همکاران (۱۳۹۰) به بررسی اثر ارتفاع تاج تلماسه بر ضریب اختلاط عرضی در کانال مستطیلی پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که وجود تلماسه، باعث افزایش سرعت برشی و جریان‌های ثانویه نسبت به حالت بستر صاف شده است که به میزان زیادی به اختلاط عرضی آلاینده کمک کرده و سرعت اختلاط را افزایش داده است. طباطبایی و همکاران (۲۰۱۳) افزایش اختلاط عرضی را در حالت وجود پوشش گیاهی کناره‌ها و تلماسه‌ها در کف موردبررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که وجود تلماسه و پوشش گیاهی در کناره‌ها به افزایش اختلاط عرضی، شدت تلاطم، تنش برشی و جریان‌های ثانویه که از فاکتورهای مؤثر بر افزایش خودپالایی رودخانه است کمک می‌کنند. در مسیرهای قوسی نیز می‌توان به مطالعات یوسوکورا و همکاران (۱۹۷۰)، چانگ (۱۹۷۱)، هالی و همکاران (۱۹۷۲)، وارد (۱۹۷٤)، کریشناپان و لو (۱۹۷۷)، انگامان (۱۹۸٦)، دمورون و رودی (۱۹۸٦) و بیک و سئو (۲۰۱۰) اشاره کرد که پراکندگی عرضی را در مسیرهای قوسی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که وجود خم و مسیرهای قوسی باعث افزایش جریان‌های ثانویه و درنتیجه افزایش اختلاط عرضی نسبت به کانال‌های مستقیم می‌شود و به‌این‌ترتیب به خودپالایی رودخانه کمک می‌کنند. شارما و احمد (۲۰۱٤) اختلاط عرضی آلودگی را در رودخانه‌ها مطالعه کردند. در این مطالعه عوامل مهم، نسبت بی‌بعد عرض کانال به عمق جریان، اثر زبری کف و جریان‌های ثانویه بودند که در بین آن‌ها جریان‌های ثانویه مهم‌ترین فاکتور معرفی شد. مرور مطالعات فوق نشان می‌دهد که وجود جریان‌های ثانویه و هرگونه تغییر در الگوی سه‌بعدی جریان می‌تواند در افزایش اختلاط عرضی مؤثر باشد. البته بیشتر مطالعات

انجام‌شده در رودخانه‌هایی انجام شده که با ویژگی‌های طبیعی خود می‌توانند باعث افزایش خودپالایی شوند. حال سؤال این مطالعه این است که درصورتی‌که مسیر رودخانه مستقیم یا بستر صاف باشد چگونه می‌توان با روش طبیعی به خودپالایی رودخانه کمک کرد به‌طوری‌که مشکلات زیست‌محیطی حداقل باشد؟ به همین منظور در این مطالعه از سازه‌های جدیدی که امروزه در رودخانه‌ها برای مدیریت رسوب معرفی شدند استفاده می‌شود. ازجمله این سازه‌ها صفحات مثلثی متصل به ساحل هستند. این نوع سازه دوستدار زیست‌محیطی هستند و معمولاً از سنگ و الوار ساخته می‌شوند و از تراز دشت سیلابی در ساحل تا بستر رودخانه شیب‌دار هستند. به‌گونه‌ای که نوک آن‌ها حتی برای جریان‌های کم مستغرق می‌باشند. آن‌ها با زاویه کم نسبت به ساحل بالادست (۲۰-۳۰ درجه) نصب می‌شوند و طول مؤثر (فاصله نوک آن‌ها از ساحل بیرونی) آن‌ها یک‌سوم عرض مجرا است (بهرامی یاراحمدی و شفاعی بجستان، ۱۳۹٤). این سازه‌ها عمدتاً برای کنترل فرسایش سواحل، انحراف جریان از سواحل به طرف مرکز مجرا، بهتر شدن وضعیت انتقال رسوب، توسعه رودخانه جهت قایق‌رانی، ترمیم و توسعه زیستگاه آبزیان رودخانه استفاده می‌شوند. اولین مطالعه در این مورد توسط بویان و همکاران (۲۰۱۰) انجام شد نتایج آن‌ها نشان داد صفحات یک سلول جریان ثانویه پادساعت‌گرد در ساحل بیرونی ایجاد می‌کنند که جریان حلزونی در قوس را خنثی می‌کند. همچنین بهرامی یاراحمدی و شفاعی بجستان (۱۳۹٤)، بدری و همکاران (۱۳۹۳) سری صفحات مثلثی متصل به ساحل را در قوس ملایم ۹۰ درجه موردبررسی قرار دادند. در مسیر مستقیم هم می‌توان به مطالعه‌ای که توسط نجفی بیرگانی و همکاران (۱۳۹۳) انجام شد، اشاره کرد که سری صفحات مثلثی متصل به ساحل را در کانال مستطیلی مستقیم آزمایش کردند و نتایجی را در رابطه با حداکثر عمق آب شستگی ارائه کردند. صفحات مثلثی اغلب برای مسائل مربوط به آب شستگی و ساحل سازی موردبررسی قرار گرفته‌اند. در این مطالعه هدف اصلی بررسی اثر صفحه مثلثی بر افزایش اختلاط عرضی و نحوه توزیع ردیاب و کمک به خودپالایی رودخانه در مسیر مستقیم است.

## مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در یک فلوم با عرض ۸۰ سانتیمتر و طول ۱۰ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد (شکل ۱). در ورودی فلوم شیرفلکه‌ای برای تنظیم دبی ورودی به فلوم قرار داشت و به‌وسیله آن میزان دبی ورودی به فلوم کنترل می‌شد. میزان دبی ورودی توسط دبی سنج آلتراسونیک ترانزیت تایم ثابت مدل UF2000 ساخت انگلستان با دقت ۱± درصد میزان قرائت‌شده، اندازه‌گیری شد. برای تنظیم عمق جریان، از دریچه کشویی انتهای فلوم استفاده شد. صفحه مثلثی از جنس پلاکسی گلاس و با ضخامت ٤ میلی‌متر انتخاب شد. طول مؤثر صفحه نیز به اندازه ۳۰ درصد عرض فلوم، یعنی ۲٤ سانتیمتر و زاویه قرارگیری نسبت به جهت جریان ٤۵ درجه در نظر گرفته شد. ارتفاع آن، هم‌اندازه عمق جریان، ۱۵ سانتیمتر و در کناره فلوم نصب شد. محل نصب صفحه در ۵۰ سانتیمتری محل ردیاب بود (شکل ۲). محلول آب و نمک به‌عنوان ماده ردیاب، در یک سرعت ثابت و نزدیک به سرعت متوسط جریان آب، در فاصله ۲/۵ متری ابتدای فلوم جایی که جریان کاملاً توسعه پیدا کرده بود تزریق می‌شد. یک شیر در بالای لوله تزریق نیز برای کنترل جریان محلول ردیاب وجود داشت. محلول ردیاب نیز توسط پمپ آکواریوم از مخزن کوچک کنار فلوم به مرکز جریان فلوم تزریق می‌شد. برای به دست آوردن توزیع غلظت در عرض فلوم از دستگاه شوری سنج که برای این مطالعه طراحی شده بود استفاده شد. این دستگاه شامل ۹٦ سنسور اندازه‌گیری غلظت بود که توسط دیتا لاگر به یک

سیستم رایانه‌ای متصل می‌شدند. غلظت‌ها در چهار مقطع عرضی که به فاصله ۱/۵ متر از هم قرار داشتند در شبکه‌ای با ۷ نقطه در عمق و عرض، قبل و بعد از تزریق ردیاب در مقاطع نشان داده شده در شکل (۲) اندازه‌گیری می‌شد. برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت نیز از دستگاه سرعت‌سنج الکترومغناطیس JEF ALECاستفاده گردید. پروفیل‌های سرعت در طول فلوم در چهار مقطع، در همان محل داده‌برداری غلظت و در خط مرکزی کانال اندازه‌گیری شدند (شکل ۳). عمق جریان در تمام آزمایش‌ها ۰/۱۵ متر بود و پروفیل‌های سرعت شامل ۱۰ نقطه در هر مقطع بود. علاوه بر این، جهت بررسی الگوی جریان، تعداد ۱۹ مقطع جهت برداشت سرعت اطراف صفحه مثلثی با زاویه ٤٥ درجه و طول مؤثر ۲٤ سانتیمتر انتخاب شد؛ که تعداد ۱۵ نقطه عرضی به ترتیب به فواصل ۵،۱۰،۱۵،۲۰،۲۵،۳۰،۳۵،٤۰، ٤۵، ۵۰، ۵۵، ٦۰، ٦۵، ۷۰ و ۷۵ سانتیمتر از دیواره فلوم (سمتی که سازه نصب است.) و ٤ لایه عمقی ۳، ۷، ۱۱ و ۱٤ سانتیمتری از کف انتخاب گردید. به‌منظور بررسی دقیق الگوی جریان، فاصله مقاطع در نزدیکی سازه نسبت به مقاطع دورتر از سازه نزدیک‌تر انتخاب شد. برای مقاطع نزدیک سازه و محل سازه فواصل ۳ و ۵ سانتیمتر و در مقاطع دورتر از سازه فواصل ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتیمتری انتخاب گردید. این آزمایش با دبی ۳٦ لیتر بر ثانیه انجام شد. درمجموع هشت سری آزمایش غلظت و یک آزمایش مربوط به الگوی جریان انجام شد. چهار آزمایش شاهد با چهار سرعت ۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۳ و ۰/۳۵ متر بر ثانیه بدون صفحه و چهار آزمایش بعدی با همین سرعت‌ها ولی با نصب صفحه انجام شد. نحوه انجام آزمایش هم به این صورت بود که پس از نصب صفحه با زاویه ٤٥ درجه نسبت به جریان در فاصله ۳ متری از مقطع ورودی، آب در سیکل بسته از منبع اصلی به مخزن کوچک ابتدای فلوم پمپاژ شده و در آنجا با عبور از آرام‌کننده وارد فلوم می‌شود. پس از تنظیم هم‌زمان مقدار دبی و عمق جریان در حد موردنظر، محلول ردیاب با استفاده از همزن که در بالای مخزن آن قرار داشت به‌وسیله پمپ کوچک از داخل مخزن به نقطه‌ای که در محور مرکزی جریان و در فاصله ۲/۵ متری از ابتدای فلوم قرار داشت تزریق می‌شد. سپس غلظت در مقاطع مشخص‌شده شکل ۳ اندازه‌گیری می‌شد. با تفاضل غلظت نقاط قبل و بعد از تزریق ردیاب غلظت هر نقطه مشخص می‌شود سپس با استفاده از فرمول زیر (رابطه ۱) واریانس توزیع غلظت نسبت به خط مرکزی فلوم به دست می‌آید. (محمودیان شوشتری، ۱۳۸۹):

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N} C_i Z^2{}_i \Delta Z_i}{\sum_{i=1}^{N} C_i \Delta Z_i} \qquad (۱)$$

در این رابطه $C_i$ غلظت هر نقطه و $Z_i$ فاصله هر نقطه از محور مرکزی کانال است و $\Delta z_i$ فاصله هر دو نقطه متوالی است. برای این‌که مقایسه کمی بین توزیع غلظت در عرض کانال در عمق متوسط انجام شود، میانگین غلظت‌ها با استفاده از روش میانگین‌گیری ذوزنقه‌ای برای مقطعی در مرکز کانال که به فاصله ٤/۵ متر از محل تزریق ردیاب قرار دارد، انجام شد. سرعت برشی نیز در طول کانال با استفاده از فرمول زیر به‌دست‌آمده است:

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g}{C^2} U\sqrt{U^2 + V^2} \qquad (۲)$$

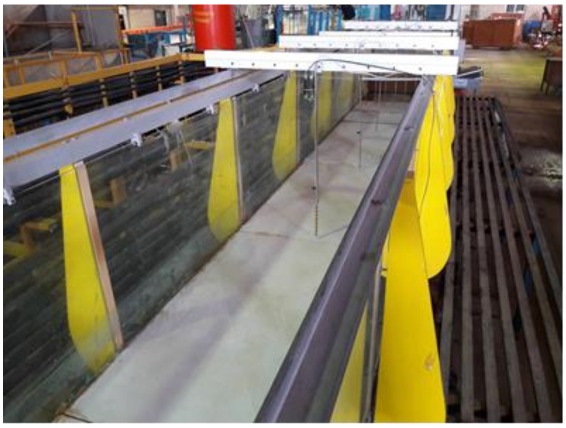
$$\tau_{by} = \frac{\rho g}{C^2} V\sqrt{U^2 + V^2} \qquad (۳)$$

$$\tau_b = \sqrt{\tau^2_{bx} + \tau^2_{by}} \qquad (٤)$$

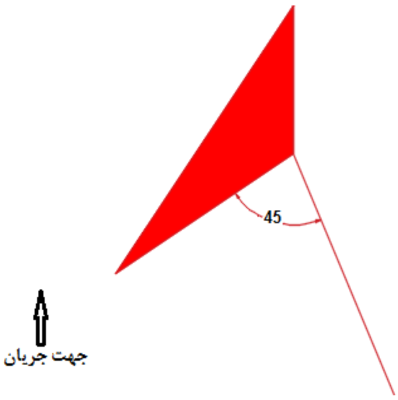
$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \qquad (۵)$$

$\tau_{bx}$ و $\tau_{by}$ به ترتیب تنش برشی بستر در جهت x و y، U و V به ترتیب متوسط عمقی سرعت در جهت‌های x و y است. $\rho$ و g به ترتیب جرم مخصوص سیال و ضریب گرانش زمین است همچنین C ضریب

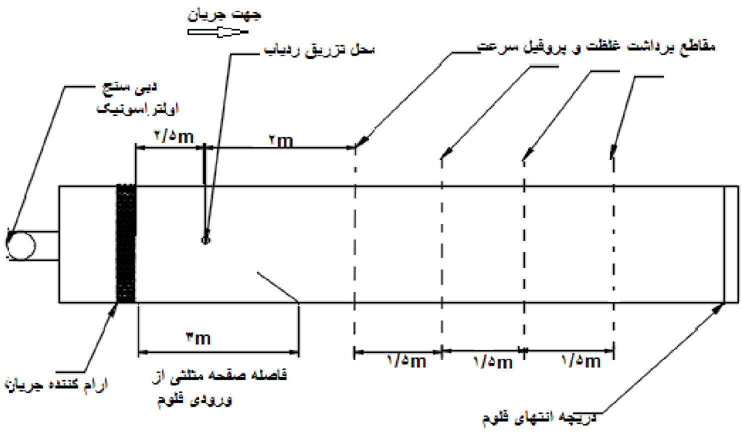
شزی است که با توجه به n ضریب مانینگ و R شعاع هیدرولیکی به دست می‌آید. با توجه به این‌که صفحات از جنس pvc بوده است ضریب مانینگ ۰/۰۱۱ در نظر گرفته شد.



شکل ۱ نمایی از فلوم آزمایشگاهی و محل حسگرهای اندازه‌گیری غلظت




شکل ۲ صفحه مثلثی نصب‌شده در فلوم

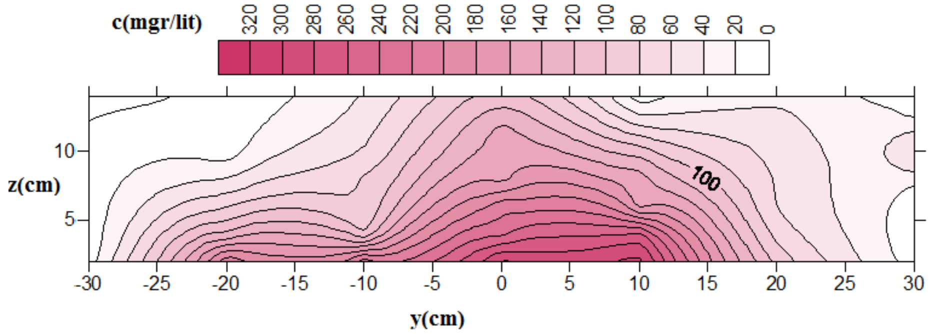



شکل ۳ پلان فلوم و تجهیزات

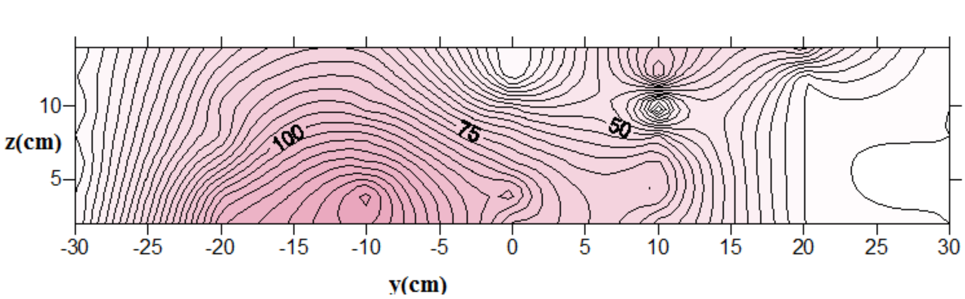
## نتایج و بحث

### بررسی الگوی توزیع غلظت ردیاب

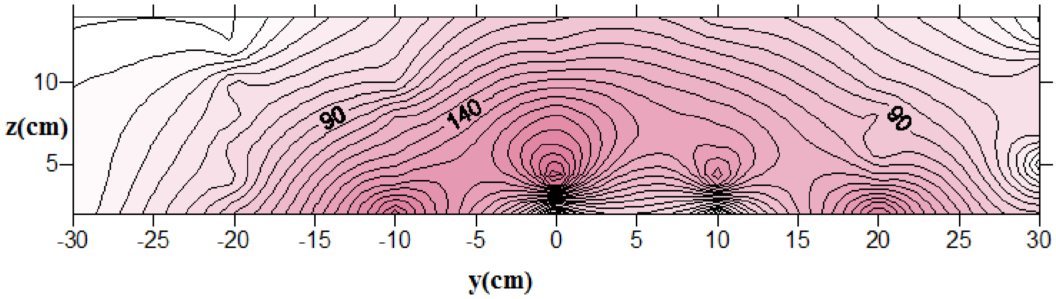
با استفاده از نرم‌افزار سورفر شکل دوبعدی توزیع غلظت برای هر چهار مقطع برای دو حالت با سازه و بدون سازه برای شرایطی که سرعت جریان ۰/۲ متر بر ثانیه است، در شکل‌های (٤) تا (٧) ترسیم گردید. مقایسه شکل‌های (٤) تا (٧) روند حرکت آلودگی در مقاطع و عمق‌های مختلف برای هر دو حالت با سازه و بدون سازه به‌صورت کیفی بیشتر مشخص می‌شود. در این شکل‌ها محور افقی y در راستای عرض فلوم و محور قائم z در راستای عمق جریان است. همان‌طور که در شکل (٤- الف) مشاهده می‌شود محل ماکزیمم غلظت تقریباً در قسمت وسط مقطع عرضی قرارگرفته است؛ زیرا همان‌طور که در آزمایش‌ها انگامان (١٩٨٦) هم مشاهده شد به دلیل اینکه محل تزریق در مرکز قرار داشت میزان حداکثر غلظت نیز تقریباً وسط اتفاق افتاده است. با مقایسه شکل (٤-الف و ب) مشاهده می‌شود که پس از نصب سازه، محل ماکزیمم غلظت تغییر کرده و در شکل ٤ ب میزان حداکثر غلظت در فاصله ١٠ سانتیمتری سمت راست مرکز کانال قرارگرفته است که این جابجایی نشان‌دهنده وجود جریان‌های عرضی به دلیل حضور سازه است. شکل (٥-الف) که غلظت ردیاب را در مقطع دوم نشان می‌دهد در مقایسه با مقطع اول یعنی شکل (٤-الف) غلظت حداکثر به‌جای تمرکز در قسمت مرکزی فلوم در چند نقطه پخش‌شده است. در شکل (٦- الف) مشاهده می‌شود، نقاط حداکثر غلظت ردیاب در شکل (٥-ب)، به‌هم‌پیوسته شده‌اند و توزیع غلظت در مقطع سوم و چهارم یعنی شکل‌های (٦-الف) و (٧-الف) تا حدودی یکنواخت شده است. حال با مقایسه دو مقطع با سازه و بدون سازه، به‌طور مثال در شکل (٤-الف) و (٤-ب)، مشاهده می‌شود که علاوه بر جابجایی عرضی محل غلظت حداکثر، مقدار حداکثر غلظت در شکل (٤-ب) نسبت به شکل (٤-الف) به میزان حدود ٥٧٪ کاهش‌یافته است. درواقع کاهش حداکثر غلظت نشان‌دهنده توزیع یکنواخت‌تر غلظت در مقطع است. همچنین مشاهده شکل‌های (٤) تا (٧) نشان می‌دهند که در هر دو حالت با سازه و بدون سازه هر چه از منبع ردیاب فاصله گرفته شود غلظت در سطح بیشتری پخش‌شده ولی این افزایش در مورد حالت با سازه شدت بیشتری دارد.



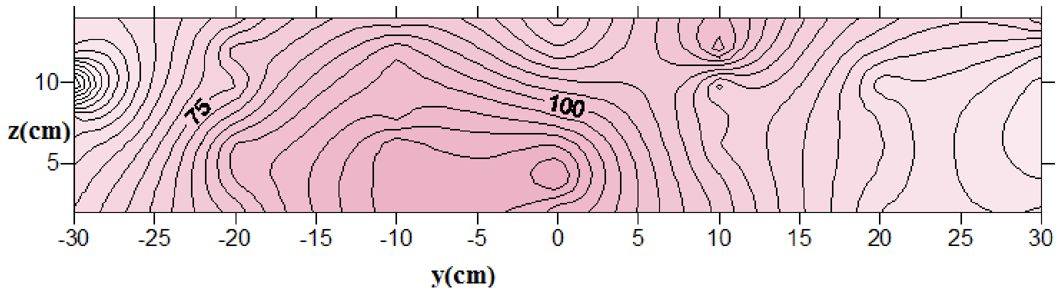

شکل ٤ الف) توزیع غلظت مقطع اول حالت بدون سازه در فاصله ٢ متری منبع ردیاب



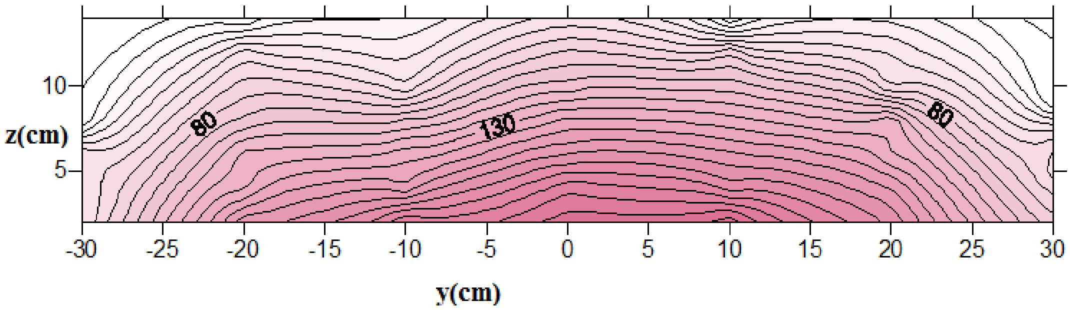

شکل ٤ ب) توزیع غلظت مقطع اول حالت با سازه در فاصله ٢ متری منبع ردیاب



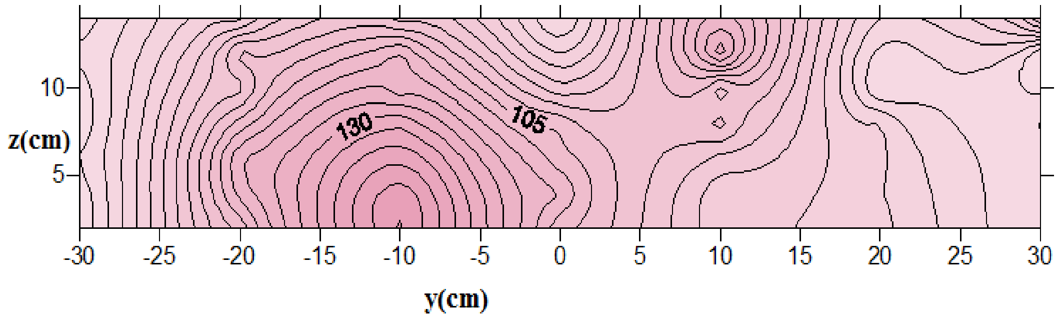

شکل ۵ الف) توزیع غلظت مقطع دوم حالت بدون سازه در فاصله ۳/۵ متری منبع ردیاب



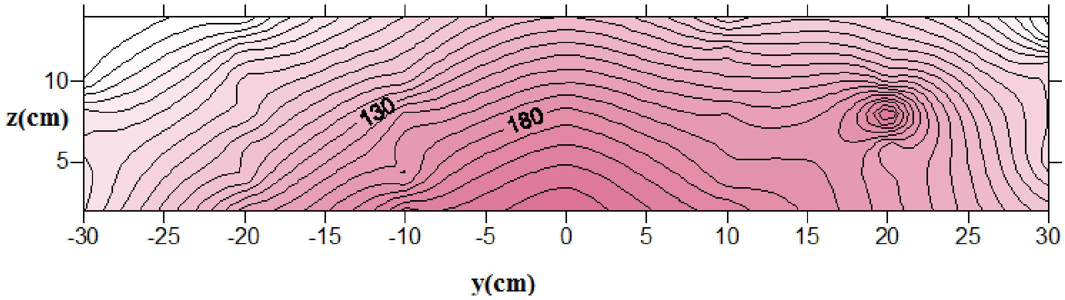

شکل ۵ ب) توزیع غلظت مقطع دوم حالت با سازه در فاصله ۳/۵ متری منبع ردیاب



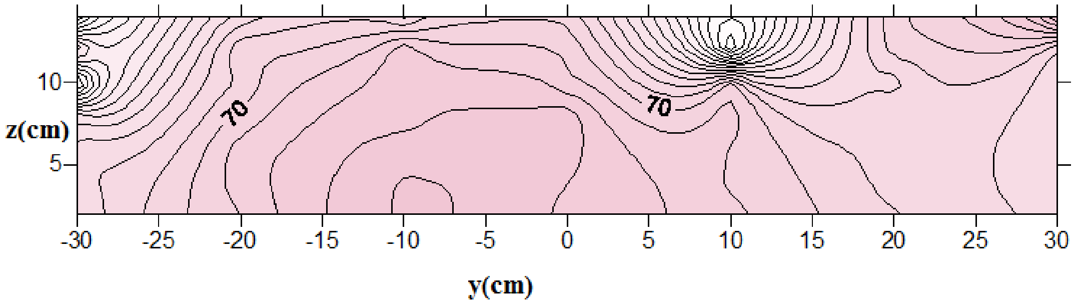

شکل ٦ الف) توزیع غلظت مقطع سوم حالت بدون سازه در فاصله ۵ متری منبع ردیاب




شکل ٦ ب) توزیع غلظت مقطع سوم حالت با سازه در فاصله ۵ متری منبع ردیاب




شکل ۷ الف) توزیع غلظت مقطع چهارم حالت بدون سازه در فاصله ٦/٥ متری منبع ردیاب



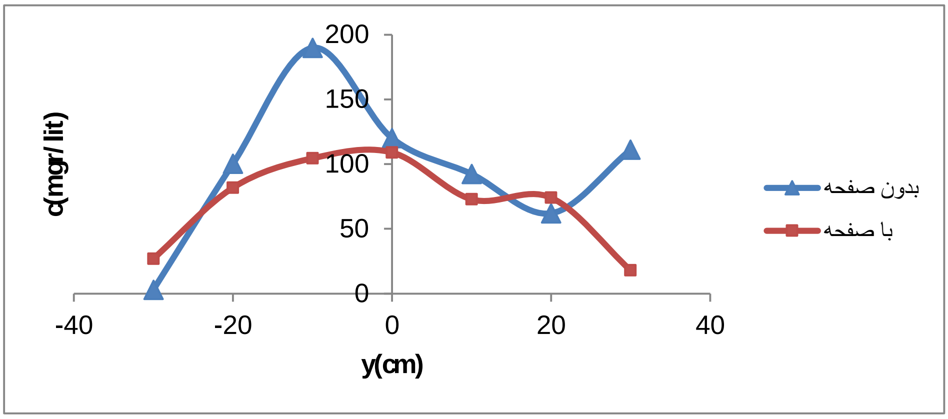

شکل ۷ ب) توزیع غلظت مقطع چهارم حالت با سازه در فاصله ٦/٥ متری منبع ردیاب

همانطور که در شکل (٤-الف) و (٤-ب) مشخص است غلظت ردیاب پس از نصب سازه در قسمت‌های مرکزی فلوم که تقریباً تمرکز غلظت در آنجاست کاهش پیداکرده است و به‌تدریج که به سمت جلو پیش می‌رود سازه اثر خود را بیشتر نمایان کرده است که در مقطع آخر یعنی شکل (۷-ب) غلظت به‌طور یکنواخت در کل مقطع توزیع‌شده است. می‌توان چنین استدلال کرد، چون در مقطع اول، غلظت با حضور سازه در فضای بیشتری پخش‌شده است بنابراین در مقاطع بعدی اندازه‌گیری غلظت، غلظت ردیاب نسبت به حالت بدون سازه در فضای بیشتری تحت تأثیر تلاطم جریان و کناره‌های فلوم که تنش برشی بالاتری دارند، قرارگرفته و اختلاط عرضی افزایش می‌یابد تا درنهایت در هیچ نقطه‌ای تمرکز غلظت دیده نمی‌شود. از طرف دیگر پس از نصب سازه تشکیل جریان‌های چرخشی در عرض فلوم باعث پخش هر چه بیشتر ماده ردیاب در عرض فلوم در مقایسه باحالت بدون نصب سازه می‌شود.

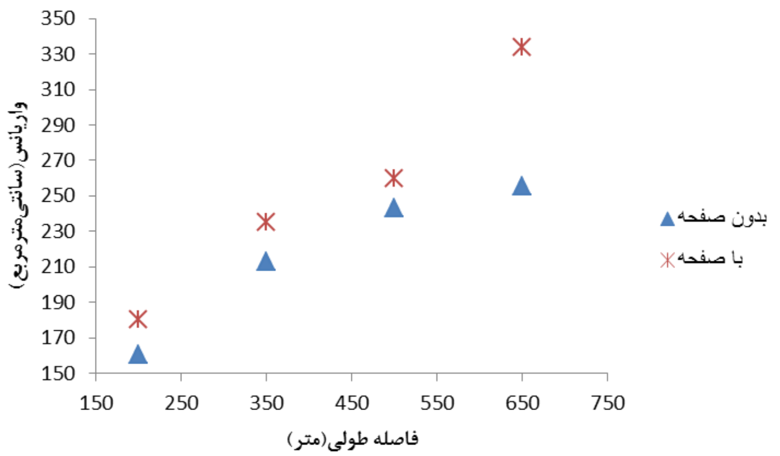
## تغییرات کمی غلظت عرضی

در شکل (۸) محور افقی، فاصله نقاط نمونه‌برداری از مرکز کانال برحسب سانتیمتر و محور قائم آن میزان غلظت را برحسب میلی‌گرم بر لیتر را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است نقطه اوج غلظت که تقریباً در مرکز کانال قرار دارد در حضور سازه به میزان ۸۰ درصد کاهش پیداکرده است. کاهش نقطه اوج در حالت با سازه نسبت به حالت بدون سازه نشان‌دهنده افزایش یکنواختی توزیع غلظت به دلیل حضور سازه است که افزایش این یکنواختی در حضور سازه به‌خوبی در شکل (۸) قابل‌مشاهده است. همچنین در این شکل مشاهده می‌شود که مقادیر غلظت ردیاب از مرکز به سمت راست کمتر از مقادیر غلظت سمت چپ (جایی که صفحه مثلثی نصب است) است؛ زیرا با انحراف جریان به سمت راست توسط سازه به دلیل این‌که سرعت طولی جریان و همچنین سرعت برشی در این محل افزایش پیداکرده است، باعث افزایش پراکندگی در این قسمت و کاهش غلظت ردیاب شده است.

پس از اندازه‌گیری توزیع عرضی غلظت بـرای دو حالت بدون سازه و با سازه، سپس واریانس مربـوط بـه توزیع آن‌ها در مقاطع مختلف برای یک دبی با سـرعت ۰/۳۵ متر بر ثانیه با استفاده از رابطه (۱) محاسبه و رسم گردید. همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، هـر چه ردیاب به سمت پائین‌دست پیش می‌رود، واریـانس هر مقطع برای هـر دو حالـت بـا سـازه و بـدون سـازه افزایشی است که ایـن مشـاهده بـا مشـاهدات هـالی و ابراهام (۱۹۷۲) که نشان داده بود واریـانس بـه‌صـورت خطی بافاصله از منبع ردیـاب افـزایش مـی‌یابـد تطابق خوبی دارد. با توجه به این‌کـه بعـد واریـانس برحسـب مربع طول است، بنـابراین بـا افـزایش فاصـله از محل تزریق ردیاب به دلیل اینکه غلظت‌ها نسـبت بـه محـور مرکزی کانال دورتـر مـی‌شـوند، واریـانس بـا افـزایش فاصله، افزایش‌یافته است. همچنین با توجه به این شکل وجود سازه باعث افزایش واریانس توزیع غلظت نسبت به حالت بدون سازه در کلیه مقاطع است به‌طوری‌که در مقطع آخر واریانس‌ها بـه میـزان ۳۰ درصـد نسـبت بـه حالت بدون سازه افزایش داشته است. از طرفـی وجـود سازه باعث شده است که روند تغییرات واریـانس‌هـا بـا شیب تندتری نسبت به حالت بدون سازه تغییر کند کـه نشان‌دهنده اثر هر چـه بیشـتر سـازه بـر الگـوی توزیـع غلظـت بـا افـزایش فاصـله از منبـع ردیـاب اسـت.



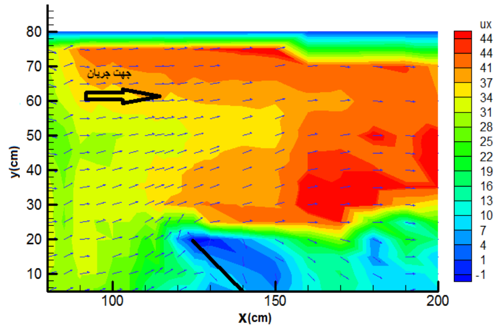

شکل ۸ نمودار توزیع غلظت در مقطع ۲ در فاصله ٤/٥ متری از محل تزریق ردیاب)



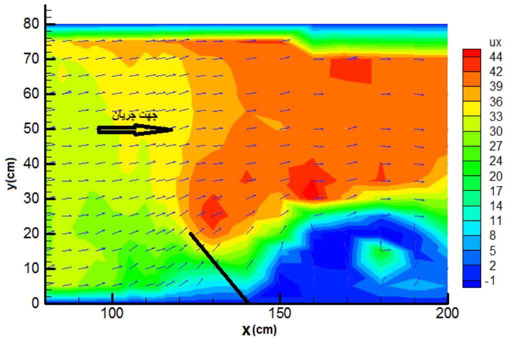

شکل ۹ روند تغییرات واریانس توزیع غلظت در مقاطع مختلف برای دو حالت با سازه و بدون سازه

## الگوی جریان

الگوی جریان در عمق ۳ سانتیمتری (شکل ۱۰ الف) و ۱٤ سانتیمتری سطح آب (شکل ۱۰ ب) با استفاده از متوسط سرعت‌ها در دو جهت طولی ( $u_x$ سرعت در راستای جریان) و عرضی ($u_y$ سرعت در راستای عرض فلوم) در پلان با استفاده از نرم‌افزار تک پلات ترسیم گردید. بردارهای سرعت نشان داده‌شده، در هر دو شکل (۱۰ الف) و (۱۰ ب)، برآیند سرعت در دو راستای عرضی و طولی است. همان‌طور که در شکل (۱۰ الف) مشاهده می‌شود، در فاصله حدود ۵۰ سانتیمتری بالادست سازه، بردارهای سرعت به‌صورت مستقیم هستند و در جهت جریان اصلی می‌باشند؛ اما از این مقطع به بعد بردارهای سرعت با زاویه حدود ۳۰ درجه منحرف‌شده است به‌طوری‌که در ۳۰ سانتیمتری سازه تا محل سازه میزان این انحراف به میزان حدود ۷۰ درجه نسبت به جهت اصلی جریان می‌رسد. این انحراف برای مقاطع پشت سازه تا فاصله حدود ٤۰ سانتیمتری ادامه دارد؛ بنابراین به دلیل انحراف بردارهای سرعت در بالادست و پایین‌دست سازه، سرعت طولی و درنتیجه سرعت برشی در مرکز و کناره‌های فلوم افزایش می‌یابد و باعث افزایش اختلاط عرضی می‌شود. در عمق‌های مختلف به دلیل شکل مثلثی سازه، از کف به سمت بالا سطح مقطع روبروی جریان کاهش می‌یابد درنتیجه، انحراف به سمت مرکز کاهش‌یافته و به همین دلیل فشردگی جریان و سرعت طولی با توجه به شکل‌های (۱۰ الف) و (۱۰ ب)، در عمق سه سانتیمتری نسبت به عمق ۱٤ سانتیمتری بیشتر است؛ و این عامل باعث می‌شود پخش ردیاب در عمق‌های مختلف متفاوت باشد. افزایش سرعت طولی و درنتیجه تنش برشی در سه سانتیمتری و ۱٤ سانتیمتری کف از بالادست سازه تا فاصله‌ای بیش از ٤ برابر طول مؤثر صفحه ادامه دارد. درنتیجه غلظت ردیاب در این فاصله نسبت به حالت بدون سازه در عرض بیشتری در فلوم اختلاط پیداکرده و هر چه به سمت پایین‌دست سازه پیش می‌رود همان‌طور که در شکل (۹) هم مشاهده شد واریانس نسبت به حالت بدون سازه افزایش‌یافته است. به‌طورکلی از این دو شکل می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که سازه‌های مثلثی با انحراف جریان در جهت عرضی، افزایش سرعت طولی و درنتیجه افزایش سرعت برشی باعث افزایش اختلاط عرضی می‌شوند.




شکل ۱۰ الف) بردارهای سرعت و الگوی جریان اطراف سازه مثلثی در عمق ۳ سانتیمتری از کف

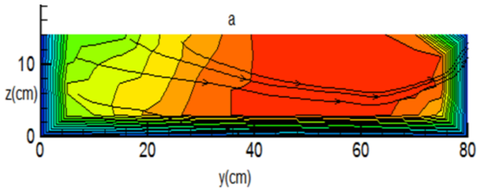



شکل ۱۰ ب) بردارهای سرعت و الگوی جریان اطراف سازه مثلثی در عمق ۱٤ سانتیمتری از کف

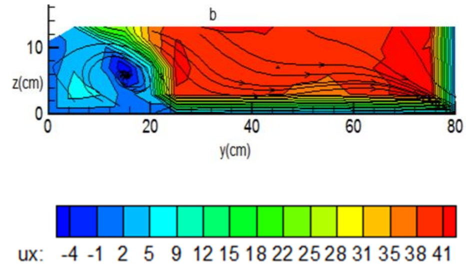
شکل (۱۱ الف) و (۱۱ ب) کنتورهای سرعت طولی و الگوی خطوط جریان را در مقاطع عرضی یکسان برای دو حالت بدون سازه و با سازه نشان داده است. اعداد صفرتا ۸۰ سانتی‌متر محور افقی، در راستای عرض فلوم و محور قائم این شکل‌ها در راستای عمق جریان می‌باشند. همان‌طور که از مقایسه این دو شکل می‌توان مشاهده کرد، خطوط جریان در حالتی که سازه

نصب‌شده است (شکل ۱۱ ب) با انحنای بیشتری نسبت به محور قائم کشیده شده‌اند. افزایش این انحنا به دلیل حضور جریان‌های ثانویه پشت سازه می‌باشند. در شکل (۱۱ الف) که حالت شاهد بدون سازه است خطوط جریان در راستای عرضی در مقایسه باحالت با سازه انحراف خطوط جریان کمتر است زیرا با نصب سازه، جریان در قسمت‌های بالایی سازه به‌طرف مرکز جریان و در کف به‌طرف ساحلی که سازه نصب است منحرف می‌شود درنتیجه باعث ایجاد جریان چرخشی در پشت سازه می‌شود و با فشرده شدن خطوط جریان در این ناحیه، سرعت طولی در مرکز جریان افزایش‌یافته که این تغییرات در الگوی جریان باعث افزایش تنش برشی در محل سازه و اطراف آن شده و درنتیجه می‌توانند باعث انتشار سریع‌تر مواد ردیاب در عرض و طول کانال گردد. در حالت بدون سازه (شکل ۱۱ الف) منحنی‌های تراز در مرکز جریان به سمت دیواره و گوشه‌های کانال به دلیل اثر جریان‌های ثانویه بیشتر کشیده شده‌اند اما پس از نصب سازه به دلیل تشکیل جریان چرخشی در پشت سازه منحنی‌های تراز نسبت به حالت قبلی به فاصله حدود ۲۰ سانتیمتری نسبت به کناره‌ها جابجا شده است که همین جابجایی باعث جابجایی ردیاب به سمت مقابل سازه که سرعت طولی و برشی بالا است شده، درنتیجه غلظت ردیاب همان‌طور که در شکل (۸) نشان داده شد، در این ناحیه کمتر شده است.

عواملی مانند سرعت برشی شدت آشفتگی و جریان‌های ثانویه برافزایش اختلاط عرضی مؤثرند؛ که یکی از این عوامل که نشان‌دهنده وجود جریان‌های ثانویه است افزایش سرعت عمودی و عرضی نسبت به حالت بدون سازه است. لذا برای بررسی اثر این عامل، نیمرخ سرعت عرضی برای هردو حالت با سازه و بدون سازه برای یکی از مقاطع یعنی مقطع چهارم بررسی می‌شود.




شکل ۱۱ الف) کنتورهای سرعت طولی و خطوط سرعت در مقطع مربوط به قبل از سازه

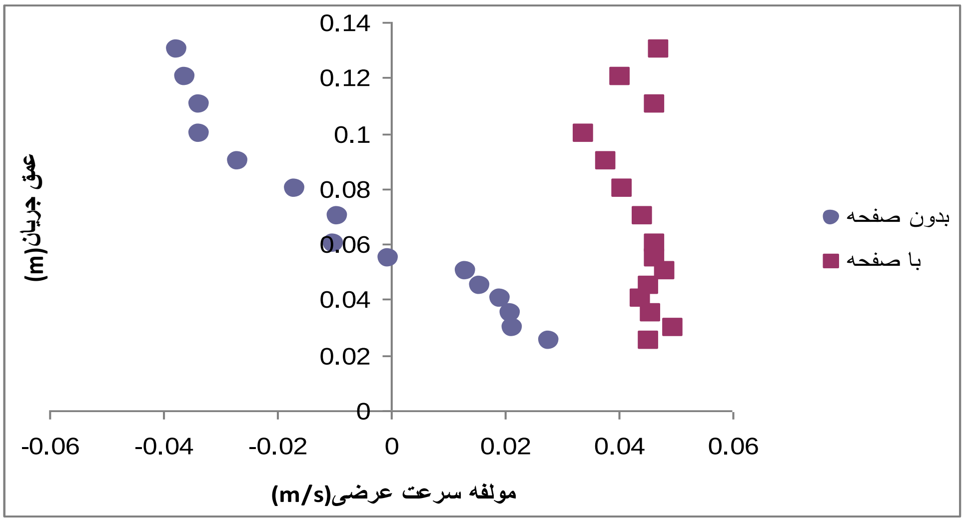



شکل ۱۱ ب) کنتورهای سرعت طولی و خطوط سرعت در مقطع مربوط به بعد از سازه

در شکل (۱۲) توزیع سرعت عرضی در برابر عمق جریان که در مرکز کانال و در محل برداشت توزیع غلظت برداشت‌شده، ترسیم‌شده است (محور افقی سرعت عرضی برحسب متر بر ثانیه و محور عمودی نشان‌دهنده عمق جریان برحسب متر است). همان‌طور که مشاهده می‌شود وجود سازه باعث شده است هم‌جهت سرعت و هم‌مقدار سرعت عرضی تغییر کند. با توجه به این‌که جریان‌های ثانویه دارای سه مؤلفه در سه جهت x و y و z هست، در حالتی که سازه وجود ندارد مؤلفه‌های سرعت عرضی معمولاً کوچک هستند ولی پس از نصب سازه به دلیل وجود جریان‌های ثانویه این جریان‌ها ازنظر مقداری بزرگ‌شده و در جهت مشخصی قرارگرفته‌اند. از مقایسه این دو پروفیل سرعت عرضی مشاهده می‌شود که تفاوت مقدار سرعت‌های عرضی بین حالت شاهد و با سازه زیاد هست. در این مقطع مشاهده می‌شود برای حالت شاهد (شکل ۱۲) محدوده تغییرات سرعت عرضی از ۰/۰۲ متر بر ثانیه در ۲/۵ سانتیمتری کف به صفر در عمق ٦ سانتیمتری کف می‌رسد و درنهایت به مقدار منفی ۰/۰٤ در نزدیکی

عمق جریان می‌رسد علامت منفی و مثبت نشان‌دهنده سرعت عرضی جریان به سمت چپ و راست فلوم هست. پس از نصب سازه در تمام عمق‌ها سرعت عرضی به مقدار مثبت و تقریباً پروفیل یکنواخت می‌رسد که در محدوده ۰/۰٤ تا ۰/۰۵ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد؛ که این نتیجه منطبق بر نتیجه شکل (۷ ب) هست که غلظت در تمام مقطع نسبت به شکل (۷ الف) کاهش و به مقدار یکنواخت در کل مقطع رسیده است.

همان‌طور که در قسمت مروری بر منابع اشاره‌شده است از عوامل مؤثر برافزایش اختلاط عرضی، نسبت عرض به عمق جریان و سرعت برشی است. با توجه به این‌که نسبت عرض به عمق جریان در این مطالعه به میزان ثابت ٥/٣٣ هست، لذا در این بخش میزان سرعت برشی در حالت با سازه نسبت به حالت شاهد برای این مطالعه و مطالعات دیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، در مطالعهٔ حاضر برای سرعت متوسط جریان ۰/۲۵ متر بر ثانیه، سرعت برشی برای حالت با سازه به میزان حدود ۱۹ درصد نسبت به حالت بدون سازه افزایش داشته است که این مقدار برای مطالعهٔ خداشناس و همکاران (۱۳۹٤) و طباطبایی و همکاران (۲۰۱۳) در حالت بستر با تلماسه، سرعت برشی به ترتیب به میزان ۱۷ درصد و ۲۳ درصد نسبت به حالت بستر صاف افزایش داشته است. درواقع این مقایسه نشان‌دهنده میزان تأثیر سازه بر اختلاط عرضی و خود پالایی رودخانه نسبت به حالتی که بستر تلماسه‌ای باشد را نشان می‌دهد. همچنین با توجه به جدول (۱) مشاهده می‌شود که در حالتی که مسیر قوسی باشد و شرایط هیدرولیکی تقریباً یکسان حاکم باشد، سرعت برشی به‌دست‌آمده در حالت با سازه تقریباً نزدیک به‌سرعت برشی‌های به‌دست‌آمده در مسیرهای قوسی برای مطالعات سئو و همکاران (۲۰۰٦) و لی و سئو (۲۰۱۲) است. در این جدول تنش برشی نیز محاسبه‌شده است که بر اساس آن، میزان افزایش تنش برشی در مطالعهٔ حاضر به میزان ٦۰ درصد نسبت به حالت بدون سازه است و برای مطالعهٔ خداشناس و همکاران (۱۳۹٤) و طباطبایی و همکاران (۲۰۱۳) میزان افزایش تنش برشی نسبت به حالت بستر صاف به ترتیب به میزان ۳٦/۲ و ٥٦/۲٥ درصد است و برای کانال قوسی شکل لی و سئو (۲۰۱۳) که شرایط هیدرولیکی مشابه مطالعهٔ حاضر را دارد میزان تنش برشی تقریباً یکسان به‌دست‌آمده است.




شکل ۱۲ پروفیل مؤلفه سرعت عرضی در مقطع چهارم

جدول ۱ مقایسه مطالعهٔ حاضر با دیگر مطالعات انجام‌شده

| شکل کانال | سرعت برشی (سانتیمتر بر ثانیه) | تنش برشی (نیوتن بر مترمربع) | نسبت عرض به عمق جریان | سرعت جریان (متر بر ثانیه) | عمق جریان (متر) | نام محققین |
|---|---|---|---|---|---|---|
| مستقیم- بستر صاف | ۱/۶۲ | ۰/۲۶۲ | ۲/۱٤ | ۰/۲٤۹ | ۰/۲۸ | خداشناس و همکاران (۱۳۹٤) |
| مستقیم- با حضور تلماسه (ارتفاع تلماسه ٤ سانتیمتر) | ۱/۸۹ | ۰/۳۵۷ | ۲/۱٤ | ۰/۲٤٥٤ | ۰/۲۸ | |
| مستقیم-بستر صاف | ۱/٦ | ۰/۲٥٦ | ۲/۱٤ | ۰/۲٤۷ | ۰/۲۸ | طباطبایی همکاران (۲۰۱۵) |
| مستقیم-تلماسه (ارتفاع تلماسه ۸ سانتیمتر) | ۲ | ۰/٤ | ۱/۸۹ | ۰/۲٤۹ | ۰/۲۸ | |
| قوسی | ۱/۳۳ | ۰/۱۸ | ٦/٦۷ | ۰/۲ | ۰/۱۵ | سئو و همکاران (۲۰۰٦) |
| قوسی | ۱/۱۷ | ۰/۱٤ | ۵ | ۰/۲ | ۰/۱۵ | لی و سئو (۲۰۱۳) |
| مستقیم بدون سازه | ۱/۲۸ | ۰/۱٦ | ۵/۳۳ | ۰/۲۵ | ۰/۱۵ | مطالعهٔ حاضر |
| مستقیم با سازه | ۱/۲ | ۰/۱٤٤ | ۵/۳۳ | ۰/۲ | ۰/۱۵ | |
| مستقیم با سازه | ۱/۵۲ | ۰/۲۳ | ۵/۳۳ | ۰/۲۵ | ۰/۱۵ | |

## نتیجه‌گیری

هدف از انجام این تحقیق بررسی اثر استفاده از صفحات مثلثی برای افزایش اختلاط عرضی و خود پالایی رودخانه بوده است. به این منظور آزمایش‌هایی با سرعت‌های مختلف بین ۰/۲ تا ۰/۳۵ و در دو حالت با سازه و بدون سازه و عمق ثابت ۱۵ سانتیمتر انجام شد. نتایج نشان داد که وجود صفحه باعث افزایش سرعت عرضی نسبت به حالت بدون سازه شده است که این تغییر در سرعت عرضی به دلیل وجود جریان‌های ثانویه است. ازآنجاکه جریان‌های ثانویه و سرعت برشی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر اختلاط عرضی و خود پالایی رودخانه است، بنابراین وجود صفحه می‌تواند روش مناسبی برای افزایش اختلاط عرضی ردیاب باشد. همچنین نتایج مربوط به تزریق ردیاب، میزان اثر سازه را نشان داد که واریانس توزیع غلظت به میزان ۳۰٪ افزایش داشته است و نقطه اوج منحنی میانگین غلظت ردیاب به میزان ۸۰٪ درصد کاهش نشان داد. همچنین نتایج مربوط به‌سرعت برشی برای حالت با سازه باعث افزایش ۱۹ درصدی سرعت برشی در حالت با سازه نسبت به حالت بدون سازه است این در حالی است که این افزایش برای حالت وجود فرم بستر به میزان ۱۷ درصد و ۲۳ درصد افزایش نسبت به حالت بستر صاف نشان داده است. در مسیرهای قوسی که شرایط هیدرولیکی مشابه باشد میزان تنش و سرعت برشی تقریباً یکسان به‌دست‌آمده است.

## مراجع


۱. بهرامی یاراحمدی, م, شفاعی بجستان, م. «تأثیر سری صفحات مثلثی در قوس ملایم ۹۰ درجه بر الگوی توپوگرافی بستر». *نشریه مهندسی عمران و محیط‌زیست دانشگاه تبریز*، دوره ٤۵,۳، شماره ۸۰، پاییز ۱۳۹٤، صفحات ۱-۱۱، (۱۳۹٤).

۲. مددیان، م. الف. ع. عابدینی، س.ف ساغروانی. «بررسی تأثیر نسبت بازشدگی کانال به نحوه انتشار آلودگی حاصل از آلوده‌ساز نقطه‌ای».

*نهمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه*، بهمن‌ماه دانشگاه شهید چمران اهواز، (۱۳۹۱).

۳. نجفی بیرگانی. ن، شفاعی بجستان. م، بهرامی یاراحمدی. م. «بررسی آزمایشگاهی تأثیر شرایط جریان بر توپوگرافی بستر در آبشکن مثلثی». *هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران*، دانشکده مهندسی عمران بابل، ۱۷ و ۱۸ اردیبهشت‌ماه، (۱۳۹۳).

٤. بدری. پ، شفاعی بجستان. م، بهرامی یاراحمدی. م. «تأثیر شرایط جریان بر توپوگرافی بستر در قوس ۹۰ درجه تحت تأثیر صفحات مثلثی». *هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران*، دانشکده مهندسی عمران بابل، ۱۷ و ۱۸ اردیبهشت‌ماه، (۱۳۹۳).

۵. قاسمی. م، حیدرپور. م، اسماعیل‌زاده. م. «اثر ارتفاع تاج تلماسه بر ضریب اختلاط عرضی در یک کانال مستطیلی». *اولین کنفرانس بین‌المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه برق‌آبی*، (۲۰۱۲).

٦. خداشناس. س. ر معارف دوست ر قاسمی، م. «مطالعهٔ پتانسیل خودپالایی جریان روی تلماسه در یک کانال مستطیلی روباز». *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*. شماره ۳، جلد ۹، صفحات ۵۳۹–۵۳۲، (۱۳۹٤).

۷. محمودیان شوشتری، م. *هیدرولیک مجاری روباز*. جلد دوم، چاپ سوم، اداره چاپ و انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، (۱۳۸۹).

8. Ward, P., "Transverse dispersion in oscillatory channel flow". *Journal of the Hydraulics Division*, 100(Proc Paper 10589), (1974).
9. Baek, K.O. and I.W. Seo, "Routing procedures for observed dispersion coefficients in two-dimensional river mixing". Advances in Water Resources, Vol. 33, No. 12, pp. 1551–1559, (2010).
10. Bhuiyan, F., R.D. Hey, and P.R. Wormleaton, "Bank-attached vanes for bank erosion control and restoration of river meanders". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 136, No. 9, pp. 583–596, (2010).
11. Chang, Y.-C. "Lateral mixing in meandering channels. in River Meandering". 1971. ASCE.
12. Demuren, A.O. and W. Rodi, "Calculation of flow and pollutant dispersion in meandering channels". *J*ournal of fluid mechanics,Vol. 10, No. 1, pp. 63-92, (1986).
13. Engmann, E., "Effect of Channel Bends on Transverse Mixing". *Nigerian Journal of Technology*, Vol. 10, No. 1, pp. 57–72, (1986).
14. Holley, E., J. Siemons, and G. Abraham, "Some aspects of analyzing transverse diffusion in rivers". *Journal of Hydraulic Research* Vol. 10, No. 1,pp. 27–57, (1972).
15. Holley, E.R. and G. Abraham, "Laboratory studies on transverse mixing in rivers". *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 11, No. 3, pp. 219-253, (1973).
16. Lee, M.E. and I.W. Seo, "Spatially variable dispersion coefficients in meandering channels". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 139, No. 2, pp. 141-153, (2012).
17. Rishnappan, B. and Y.L. Lau, "Transverse mixing in meandering channels with varying bottom topography". *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 15, No. 4, pp. 351-370, (1977).
18. Seo, I., K.O. Baek, and T.M. Jeon, "Analysis of transverse mixing in natural streams under slug tests". *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 44, No. 3, pp. 350-362, (2006).
19. Yotsukura, N., H.B. Fischer, and W.W. Sayre, Measurement of mixing characteristics of the Missouri River between Sioux City, Iowa, and Plattsmouth, Nebraska. USGPO, (1970).

20. Tabatabaei, S., et al. "Transverse Mixing Coefficient on Dunes with Vegetation on a Channel Wall". in World Environmental and Water Resources Congress: Showcasing the Future. (2013).
21. Sharma, H. and Z. Ahmad, "Transverse mixing of pollutants in streams: a review". *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 41, No. 5, pp. 472-482, (2014).